第38卷 第2期
2021年3月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 38 No. 2
Mar. 2021

阜新露天煤矿排土场边坡土壤团聚体稳定性及分形特征

王 凯[1]， 那恩航[1]， 张 亮[2]， 刘 锋[3]

（1. 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院，辽宁 阜新 123000；2. 龙井市河道堤防管理站，吉林 龙井 133400；
3. 中煤科工集团沈阳研究院有限公司，辽宁 沈阳 110016）

摘 要：露天煤矿排土场边坡水土流失严重。以阜新露天煤矿排土场为对象，探究不同坡位、坡向和恢复年限间土壤团聚体稳定性及分形维数的差异，为排土场边坡生态恢复提供理论依据。选取自然恢复5 a和10 a排土场边坡，分析坡上、坡中和坡下以及阴坡与阳坡间土壤团聚体的平均质量直径（MMD）、几何平均直径（GMD）、分形维数（D）和破坏率（PAD）的差异及其影响因素。结果表明：恢复5 a阴坡及恢复5 a和10 a阳坡土壤团聚体的MMD和GMD从坡上到坡下逐渐增加，D和PAD逐渐减小。MMD和GMD阴坡大于阳坡，D和PAD阴坡小于阳坡。恢复5 a与10 a边坡团聚体的MMD、GMD、D和PAD差异均不显著。与对照裸地相比，坡上团聚体稳定性下降，坡中和坡下略有增加。排土场边坡土壤团聚体的D与MMD、GMD和>0.25 mm团聚体含量呈显著负相关，与PAD呈显著正相关。机械稳定性团聚体的D与含水量呈显著负相关，水稳性团聚体的D与有机质含量呈显著负相关。说明土壤结构和稳定性表现为阴坡好于阳坡，坡下优于坡上，应对不同坡位和坡向采取不同的恢复措施。

关键词：排土场；土壤团聚体；坡向；坡位；矿区生态恢复

我国是世界上最大的煤炭生产和消费国，煤矿的开采严重影响了矿区周边的生态环境[1]。排土场是露天开采产生的岩土、矸石等大量剥离物质在原地貌上堆积形成的巨型山体，其侵占了大量土地，污染了土壤、地下水和空气[2]；特别是排土场边坡，水土流失严重，易发生滑坡、泥石流等地质灾害[3]。因此，开展露天煤矿排土场的土地复垦与生态恢复工作对保护生态安全及构建国家绿色生态屏障具有重要意义[4]。阜新露天煤矿开采已有百年历史，矿区形成排土场（矸石山）240余座，占地面积约1.3×10^4 hm^2，总堆积量为12×10^8 m^3，严重影响了矿区生态环境与可持续发展。虽然部分排土场已开展了土地复垦工作，但几年后大量植物出现了枯萎、死亡以及生长衰退现象[5]。这主要由于排土场生态恢复基础研究不足，缺乏相应治理对策和技术支撑。

排土场土壤为采煤废弃物，堆积过程中不断进行碾压，土壤团聚结构遭到破坏，结构性差，极易发生水土流失[6]。土壤团聚体作为土壤结构的基本单元，其大小分布和稳定性影响着土壤孔隙性、持水性、通透性和抗蚀性，决定了土壤侵蚀、压实、板结等物理过程与作用，是土壤肥力的基础和评价土壤质量的重要指标[6]。自1967年分形理论提出，分形学在土壤研究中得到广泛应用，分形维数能够表征土壤有机质含量、群落中指示植物重要值和土地荒漠化程度[7]，是定量描述土壤结构和性质的重要参数[8]。目前关于土壤团聚体稳定性及分形维数已广泛应用于森林[9]、坡耕地[10]、退耕地[11]、岩溶山地[8]以及公路[12]和铁路[13]边坡生态恢复的研究中，而对于排土场边坡这种重构土壤研究还较少[14]。唐骏等[6]对黄土区煤矿排土场研究发现，排土场平台土壤团聚体稳定性高于边坡，平台上草地对团聚体改良效果较好，而边坡上灌木改良效果更好。王杨扬等[15]研究发现，排土场土地复垦中混交林土壤团聚体稳定性优于纯林。

坡位和坡向是重要立地因子。不同坡位间在

收稿日期：2020-05-20； **修订日期：**2020-07-11
基金项目：国家自然科学基金（31400613）和辽宁省“兴辽英才计划”项目（XLYC1807017）资助
作者简介：王凯（1981-），男，博士，副教授，主要从事荒漠化防治与生态恢复. E-mail: wangkai_2005@hotmail.com

水土流失程度、土层厚度等方面存在差异,不同坡向间在光照、土壤温度、水分及养分不同;二者间接影响土壤团聚体的形成过程与稳定性[16]。关于排土场不同坡位及坡向的土壤团聚体稳定性特征尚不清楚,笔者前期研究发现,不同坡位和坡向的植被演替规律[5]、植物多样性及生产力[17]具有显著差异,而这均与土壤结构及稳定性密切相关。因此,本研究以阜新露天煤矿不同恢复年限的排土场边坡为对象,分析不同坡向和坡位土壤团聚体组成及稳定性特征,探讨土壤团聚体稳定性及分形维数的影响因素,为露天煤矿排土场边坡土地复垦与生态恢复工作提供理论依据。

1　研究区概况与方法

1.1　研究区概况

研究区位于辽宁省阜新市海州露天煤矿排土场,地理坐标为121°38′33″E,41°57′16″N,属于温带大陆性季风气候区。年均降水量539 mm,蒸发量1800 mm,年平均气温7~10 ℃,平均相对湿度50%~60%。地带性土壤主要为淋溶褐土和褐土性土,排土场基质除地带性土壤外,还含有采矿排出的页岩、砂岩等采煤废弃物。排土场边坡土层较薄,在5~20 cm之间。植被属华北与蒙古植物区系的过度地带,分布着较为旱生的草本和灌木,如荆条(*Vitex negundo* Linn. var. *heterophylla*)、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、狗尾草(*Setaria viridis*)等[17]。

1.2　试验设计

根据海州露天矿务局资料记载和实地勘查,选择自然恢复5 a和10 a排土场为研究对象。排土场为自西向东连续堆积形成的梯形山体,边长约30 m,坡度35°左右,坡长约60 m,坡长与坡度为排土场堆积的常见状态,附近无高大山脉遮光,为自然光照水平。沿着排土场底边边长每隔10 m设置一条采样带,共设置3条采样带,每条采样带为一个重复。在每条采样带上划分为阴坡和阳坡,阴坡和阳坡坡向通过手持罗盘仪进行测量,阴坡朝向为NE24°,阳坡朝向为SW22°。将每个阴坡和阳坡的坡面平均分成3段,每段坡面长度约20 m,划分成坡上、坡中和坡下作为研究样地。每块样地大小约为10 m×20 m,12块不同类型样地,每块样地3个重复,共计36个样地。根据生态恢复成功的标准,以该地区原始地貌土壤状况为参考,在排土场附近选择3块20 m×20 m自然撂荒的裸地作为对照。样地植物特征及土壤理化性质见表1[17-18]。

表1　排土场边坡植物特征及土壤理化性质

Tab. 1　Plant characteristics and soil physical and chemical properties on dump slopes

恢复年限/a	坡向	坡位	主要植被	含水量/%	容重/(g·cm^{-3})	毛管孔隙度/%	有机质含量/(g·kg^{-1})
0	裸地	平地	狗尾草、蒺藜(*Tribulus terrester*)、旱稗(*Echinochloa hispidula*)	8.70±1.38	1.43±0.01	39.86±1.45	8.32±0.15
5	阴坡	坡上	铁杆蒿、草木犀(*Melilotus officinalis*)、狗尾草	8.22±0.44	1.50±0.01	38.94±0.24	6.20±0.31
		坡中	铁杆蒿、白蒿(*Artemisia anethoides*)、狗尾草	8.23±0.40	1.45±0.04	39.97±1.07	8.37±0.31
		坡下	铁杆蒿、狗尾草、白蒿	8.29±0.39	1.43±0.03	42.62±0.78	9.30±0.44
	阳坡	坡上	蒺藜、旱稗、狗尾草	7.70±0.69	1.44±0.00	35.11±0.09	6.48±0.31
		坡中	狗尾草、旱稗、早熟禾(*Poa annua*)	8.34±0.96	1.38±0.03	41.21±0.77	8.32±0.16
		坡下	狗尾草、蒺藜、白蒿	9.72±0.66	1.33±0.03	40.61±0.43	8.82±0.37
10	阴坡	坡上	铁杆蒿、榆树(*Ulmus pumila*)、萝藦(*Metaplexis japonica*)	8.86±1.09	1.57±0.03	36.24±0.62	6.15±0.33
		坡中	铁杆蒿、兴安胡枝子(*Lespedeza davurica*)、狗尾草	9.45±0.44	1.28±0.00	43.98±0.16	10.10±0.34
		坡下	狗尾草、铁杆蒿、细叶胡枝子(*Lespedeza hedysaroides*)	9.92±0.62	1.27±0.04	42.15±1.43	11.65±0.17
	阳坡	坡上	狗尾草、草木犀、茵陈蒿(*Artemisia capillaris*)	6.11±0.49	1.39±0.04	36.30±0.71	7.69±0.54
		坡中	页蒿(*Carum carvi*)、狗尾草、萝藦	6.64±0.27	1.32±0.03	45.92±1.39	8.02±0.16
		坡下	白蒿、狗尾草、草木犀	6.96±0.86	1.32±0.03	44.73±0.98	9.62±0.13

2015年8月中旬，每个样地中从上到下设置5个4 m×4 m样方，在每个样方中按照S型随机选取5个取样点。去掉地表植被及枯落物后，采集0~10 cm的原状土，5个取样点混合成1个样品。由于排土场边坡土层较薄，植物对土壤改良作用仅限于表层土壤。在采集和运输过程中尽量减少对土样的扰动，避免破坏土壤结构。带回实验室后，剔除粗根和小石块，将土壤平摊在通风透气处，自然风干。采用干筛法测定土壤机械稳定性团聚体含量，湿筛法测定土壤水稳性团聚体含量；采用烘干法测量土壤含水量，环刀法测量土壤容重和毛管孔隙度，重铬酸钾–外加热法测定有机质含量[19]。

1.3 研究方法

土壤团聚体平均质量直径（Mean Mass Diameter，MMD）和几何平均直径（Geometric Mean Diameter，GMD）的计算公式分别如下式所示。

$$\mathrm{MMD}=\sum_{i=1}^{n}(\bar{R}_i w_i)\Big/\sum_{i=1}^{n}w_i \quad (1)$$

$$\mathrm{GMD}=\exp\left(\sum_{i=1}^{n}w_i\ln R_i\Big/\sum_{i=1}^{n}w_i\right) \quad (2)$$

式中：R_i为某级团聚体平均直径，w_i为某级团聚体组分干重。

粒径>0.25 mm团聚体破坏率（Percentage of Aggregate Destruction，$PAD_{0.25}$）计算公式为：

$$\mathrm{PAD}_{0.25}=\left(\mathrm{DR}_{0.25}-\mathrm{WR}_{0.25}\right)/\mathrm{DR}_{0.25}\times100\% \quad (3)$$

式中：$DR_{0.25}$和$WR_{0.25}$分别为机械稳定性和水稳性团聚体含量（%），即干筛法和湿筛法测量的粒径>0.25 mm团聚体含量。

团聚体分形维数（Fractal Dimension，D）运用分形理论建立土壤团粒结构分形模型，小于某一特定测量尺度的累积土粒质量m_i与d_i之间的分形关系式为：

$$(d_i/d_{\max})^{3-D}=m_i/m_{\max} \quad (4)$$

式中：d_i为相邻两筛的分级粒径平均值（mm），$d_{\max}$为最大土粒的粒径（mm）；m_i为粒径小于d_i的累积土粒质量（g），$m_{\max}$为各级粒径的质量总和（g），D为分形维数；以$\lg(m_i/m_{\max})$和$\lg(d_i/d_{\max})$为纵、横坐标作图，3–D为该直线斜率，用回归分析方法计算土壤分形维数。

运用Kolmogorov-Smirnov检验数据是否符合正态分布，对于不同坡位、坡向和恢复年限的土壤团聚体大小和稳定性指标的差异采用单因素方差（One-Way ANOVA）分析，运用Duncan检验方法进行多重比较。对土壤团聚体D与MMD、GMD、$DR_{0.25}$、$WR_{0.25}$和PAD的关系进行回归分析，对D与土壤理化性质的关系采用Spearman方法进行相关分析。所有数据处理与分析均运用SPSS 16.0统计分析软件完成。运用Excel绘制图表，图表中的误差用标准误表示。

2 结果与分析

2.1 排土场边坡土壤机械稳定性团聚体组成

土壤团聚体组成指不同粒级土壤颗粒重量占总重量的百分比，是影响土壤结构和肥力的重要因素[20]。团聚体粒径>1 mm为极粗砂，1~0.5 mm为粗砂，0.5~0.25 mm为中砂，均属较大粒径团聚体，稳定性强，是土壤肥力的重要物质基础；粒径<0.25 mm为微团聚体，其数量和组合是构成土壤肥力的实质，但结构不稳定，养分易流失[21]。

干筛法测定的是自然状态下土壤机械稳定性团聚体含量，包括水稳性和非水稳性团聚体，由于其较少破坏土壤中瞬变性和临时性的有机胶结物质（如生物产生的多糖、植物根、真菌菌丝体等），可以反映自然状态下土壤团聚体的分布特征[14]。由表2可知，排土场边坡土壤$DR_{0.25}$变化范围为47.3%~62.0%。由于排土场土壤组成物质复杂，包括粉沙岩、砾岩、页岩以及采煤废弃物等，结构较差，同时边坡易遭受风力和水力侵蚀，导致团聚体机械稳定性较差。$DR_{0.25}$表现为阴坡>阳坡，坡上较低，坡中和坡下较高，恢复5 a与恢复10 a无显著差异。与对照裸地相比，$DR_{0.25}$在恢复10 a阴坡坡上、坡中和坡下分别增加了4.43%、19.46%和11.56%；在恢复10 a阳坡坡上下降了8.86%，坡中和坡下分别增加了1.16%和7.51%。

不同坡位间，恢复5 a阴坡及恢复5 a和10 a阳坡均表现为粒径>0.5 mm团聚体含量从坡上到坡下逐渐升高，粒径<0.5 mm团聚体含量逐渐降低；而恢复10 a阴坡粒径>0.5 mm团聚体含量在坡中最大，粒径0.5~0.25 mm团聚体含量从坡上到坡下逐渐降低，粒径<0.25 mm团聚体含量坡中<坡下<坡上。不同坡向间，粒径>1 mm、1~0.5 mm和0.5~0.25 mm团聚体含量阴坡>阳坡，而粒径<0.25 mm团聚体含量

表2 排土场边坡土壤机械稳定性团聚体组成

Tab. 2 Composition of soil mechanical-stable aggregates on dump slopes /%

恢复年限/a	坡向	坡位	粒径/mm				$DR_{0.25}$
			>1	1~0.5	0.5~0.25	<0.25	
0	裸地	平地	16.2±1.0	15.8±0.9	19.9±0.8	48.1±1.1	51.9±1.1
5	阴坡	坡上	17.3±0.5b	15.7±1.0b	22.1±1.1	44.9±0.4a	55.1±0.4b
		坡中	19.3±0.6ab	15.8±0.2b	21.4±0.7	43.5±0.6ab	56.5±0.6ab
		坡下	20.2±0.8a	18.2±0.5a	20.8±1.2	40.8±1.0b	59.2±1.0a
	阳坡	坡上	15.5±1.1	12.0±0.9b	19.8±1.5	52.7±1.8a	47.3±1.8b
		坡中	16.1±1.5	13.8±0.9b	17.6±0.8	52.5±1.7a	47.5±1.7b
		坡下	18.7±1.7	17.9±0.4a	16.8±1.8	46.6±0.7b	53.4±0.7a
10	阴坡	坡上	15.8±0.3c	16.1±0.5b	22.3±1.1	45.8±0.3a	54.2±0.3c
		坡中	22.9±0.4a	20.0±0.4a	19.1±1.7	38.0±0.7c	62.0±0.7a
		坡下	19.3±0.6b	19.9±0.2a	18.7±1.0	42.1±0.8b	57.9±0.8b
	阳坡	坡上	16.0±0.4b	13.9±0.4b	17.4±0.2a	52.7±0.9a	47.3±0.9b
		坡中	17.1±1.3ab	19.4±1.3a	16.0±0.8ab	47.5±1.3ab	52.5±1.3ab
		坡下	20.0±0.4a	20.9±0.7a	14.9±0.3b	44.2±0.9b	55.8±0.9a

注: $DR_{0.25}$表示机械稳定性团聚体含量,不同小写字母表示相同坡向不同坡位差异显著(P<0.05)。下同。

阴坡<阳坡。随着恢复年限增加,粒径>1 mm和1~0.5 mm团聚体含量增加,粒径0.5~0.25 mm和<0.25 mm团聚体含量降低。对照裸地的粒径>1 mm和1~0.5 mm团聚体含量<阴坡的坡中和坡下,而粒径<0.25 mm团聚体含量>阴坡的坡中和坡下(表2)。

2.2 排土场边坡土壤水稳性团聚体组成

湿筛法测定的是土壤水稳性团聚体含量,其是由土壤颗粒凝聚、胶结和黏结而相互联结组成的,能够反映土壤潜在的抗蚀能力[22]。由表3可知,排土场边坡土壤$WR_{0.25}$为37.9%~56.3%,说明排土场边坡土壤抗水力侵蚀能力差。$WR_{0.25}$表现为阴坡>阳坡,恢复5 a与恢复10 a差异不显著;恢复10 a阴坡最大值在坡中,而恢复5 a阴坡及恢复5 a和10 a阳坡在坡下。与对照裸地相比,$WR_{0.25}$在恢复10 a阴坡坡上、坡中和坡下分别增加了4.75%、33.73%和22.33%;在恢复10 a阳坡坡上下降了4.75%,坡中和坡下分别增加了7.60%和18.05%。

不同坡位间,恢复5 a阴坡及恢复5 a和10 a阳坡粒径>0.5 mm团聚体含量表现为从坡上到坡下逐渐升高,粒径<0.5 mm团聚体含量逐渐降低;恢复10 a阴坡粒径>1 mm和1~0.5 mm团聚体含量坡中和坡下>坡上,粒径0.5~0.25 mm团聚体含量从坡上到坡下逐渐降低,粒径<0.25 mm团聚体含量坡中<坡下<坡上。不同坡向间,粒径>1 mm、1~0.5 mm和0.5~0.25 mm团聚体含量阴坡>阳坡,粒径<0.25 mm团聚体含量阴坡<阳坡。随着恢复年限增加,粒径>1 mm和1~0.5 mm团聚体含量增加,粒径0.5~0.25 mm和<0.25 mm团聚体含量降低。对照裸地的粒径>1 mm和1~0.5 mm团聚体含量<阴坡的坡中和坡下,而粒径<0.25 mm团聚体含量>阴坡的坡中和坡下(表3)。

2.3 排土场边坡土壤团聚体稳定性特征

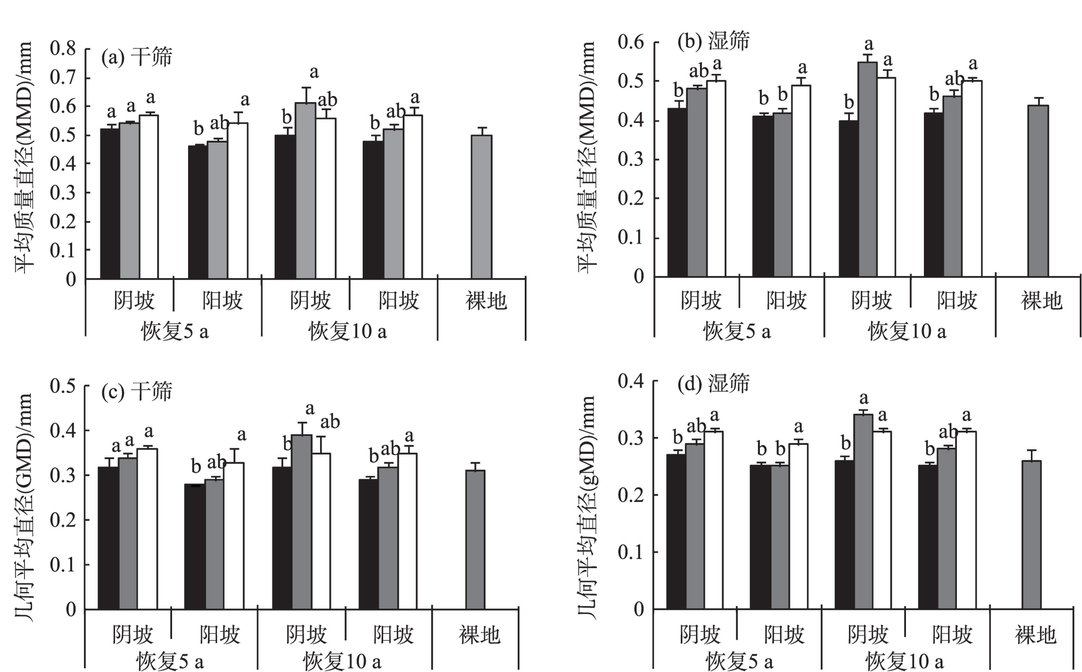
表征土壤团聚体稳定性指标主要有团聚体的MMD、GMD、D和PAD。土壤团聚体组成是一个连续性的不同直径大小和不同含量的集合,MMD和GMD是常用分析团聚体分布特征的指标,其值越大表示团聚度越高,稳定性越强[23]。由图1可知,干筛法和湿筛法测定的排土场土壤机械稳定性和水稳性团聚体的MWD和GMD变化规律一致。恢复5 a阴坡及恢复5 a和10 a阳坡土壤机械稳定性和水稳性团聚体的MMD和GMD从坡上到坡下逐渐增加,恢复10 a阴坡在坡中最大;MMD和GMD阴坡>阳坡,随着恢复年限增加无显著差异。与对照裸地相比,机械稳定性团聚体的MMD和GMD在恢复10 a阴坡平均增加了11.33%和8.67%,而在阳坡坡上减少了4.00%和6.45%。水稳性团聚体的MMD和GMD在恢复10 a阴坡坡上降低了9.09%和0.01%,在坡中增加了25.00%和30.77%,在坡下增加了15.91%和19.23%;在恢复10 a阳坡坡上降低了4.55%和3.85%,在坡中增加了4.55%和7.69%,在坡

表3 排土场边坡土壤水稳性团聚体组成

Tab. 3 Composition of soil water-stable aggregates on dump slopes /%

恢复年限/a	坡向	坡位	粒径/mm				$WR_{0.25}$
			>1	1~0.5	0.5~0.25	<0.25	
0	裸地	平地	14.3±1.2	12.5±0.9	15.3±1.2	57.9±1.3	42.1±1.3
5	阴坡	坡上	12.5±0.8a	12.7±0.7b	20.7±0.6	54.1±0.5a	45.9±0.8b
		坡中	15.4±0.9ab	14.7±1.5ab	19.0±0.4	50.9±1.0ab	49.1±1.0ab
		坡下	16.2±0.3b	17.1±0.8a	18.5±1.2	48.2±0.6b	51.8±0.6a
	阳坡	坡上	12.3±0.5b	12.5±0.9b	13.1±0.3	62.1±0.8a	37.9±0.8b
		坡中	13.4±0.5b	12.1±0.3b	13.4±0.5	61.1±0.7a	38.9±0.7b
		坡下	16.6±0.6a	16.4±0.7a	12.4±1.1	54.6±0.3b	45.4±0.3a
10	阴坡	坡上	10.9±1.3b	12.3±1.5b	20.9±1.1	55.9±0.7a	44.1±0.7c
		坡中	18.9±0.6a	19.3±1.3a	18.1±1.0	43.7±0.8c	56.3±0.8a
		坡下	17.2±1.1a	17.2±0.7a	17.1±0.7	48.5±0.3b	51.5±0.3b
	阳坡	坡上	13.8±0.5b	11.6±1.1b	14.7±0.4	59.9±0.5a	40.1±0.5c
		坡中	15.4±0.7ab	13.8±0.7b	16.1±1.2	54.7±0.7b	45.3±0.7b
		坡下	17.0±0.7a	16.9±0.8a	15.8±0.8	50.3±0.4c	49.7±0.4a

注：$WR_{0.25}$表示水稳性团聚体含量。



注:不同小写字母表示相同坡向不同坡位间差异显著(P<0.05)。下同。

图1 排土场边坡土壤团聚体平均质量直径和几何平均直径

Fig. 1 Mean mass diameter and geometric mean diameter of soil aggregates on dump slopes

下增加了13.64%和19.23%(图1)。

D可以表征土壤结构组成及其均匀程度，其值越小，土壤容重越小，土壤含蓄水分和保持水土功能越强，稳定性越高[24]。由图2可知，土壤机械稳定性团聚体的D在不同坡位及恢复年限间无显著差异，而阴坡<阳坡。水稳性团聚体的D在不同恢复年限间及恢复5 a的不同坡位间无显著差异，而在恢复10 a的阴坡坡中和阳坡坡下最小，阴坡<阳坡(图2)。与对照裸地相比，机械稳定性的D在恢复10 a阴坡坡上增加了0.41%，坡中和坡下分别下降了2.06%和0.82%，在阳坡坡上、坡中和坡下分别增加了2.88%、1.23%和0.01%。水稳性团聚体的D在恢

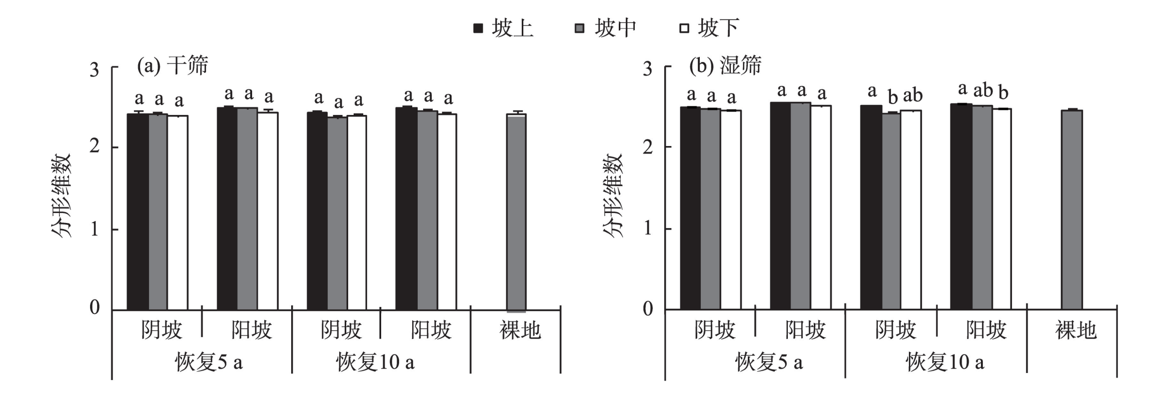


图2　排土场边坡土壤团聚体分形维数

Fig. 2　Fractal dimension of soil aggregates on dump slopes

复10 a阴坡坡上增加了2.03%,坡中和坡下分别下降了1.63%和0.41%,在阳坡坡上、坡中和坡下分别增加了3.25%、2.03%和0.81%(图2)。

PAD表示团聚体在水蚀作用下的分散程度,其值越小,稳定性越高[12]。由图3可知,土壤团聚体的PAD在恢复5 a阴坡及恢复5 a和10 a阳坡从坡上到坡下逐渐减小,而在恢复10 a阴坡坡中最小;且PAD在恢复5 a阴坡<阳坡。随着恢复年限增加,

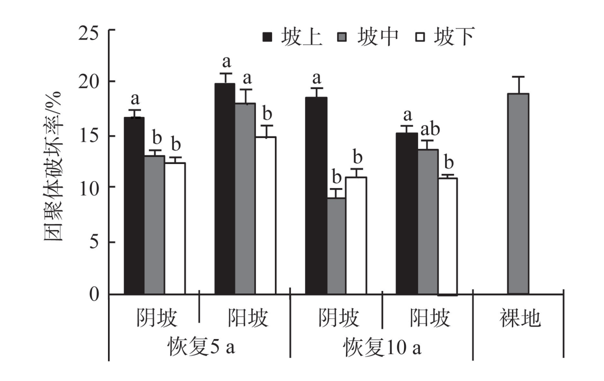


图3　排土场边坡土壤团聚体破坏率

Fig. 3　Percentage of aggregate destruction of soil aggregates on dump slopes

PAD呈降低趋势。与对照裸地相比,在恢复10 a阴坡坡上、坡中和坡下分别下降了1.48%、52.27%和41.21%,在阳坡坡上、坡中和坡下分别减少了19.49%、27.44%和41.74%(图3)。

2.4　排土场边坡土壤团聚体分形维数与稳定性的关系

排土场边坡土壤机械稳定性和水稳性团聚体的D与MMD、GMD和>0.25 mm团聚体含量呈显著负相关(P<0.05),而与PAD呈显著正相关(P<0.05)(表4)。回归分析结果说明排土场边坡土壤团聚体D值越小,团聚体平均粒径越大,稳定性团聚体含量越高,破坏率越小,团聚体稳定性越强;反之,团聚体D值越大,稳定性越差。排土场边坡土壤团聚体分形维数能够反映团聚体分布、含量及其结构破坏率对土壤结构与稳定性的影响趋势。

2.5　排土场边坡土壤团聚体分形维数与土壤理化性质的关系

干筛法反映的是自然状态下风干土壤团聚体的分布特征,风干团聚体进行湿筛处理的过程实质上是一种能量的输入,当输入能量超过风干团聚体

表4　排土场边坡土壤团聚体分形维数与各稳定性指标的关系

Tab. 4　Relationships between soil aggregate fractal dimension and stability parameters on dump slopes

分形维数	稳定性指标	回归方程	R^2	显著性
机械稳定性团聚体	MMD	y=−1.08x+3.15	0.78	<0.001
	GMD	y=−0.80x+2.27	0.85	<0.001
	$DR_{0.25}$	y=−123.87x+356.28	0.94	<0.001
	$PAD_{0.25}$	y=61.86x−136.16	0.43	0.016
水稳性团聚体	MMD	y=−0.98x+2.91	0.63	0.001
	GMD	y=−0.67x+1.96	0.71	<0.001
	$WR_{0.25}$	y=−127.35x+363.78	0.76	<0.001
	$PAD_{0.25}$	y=57.19x−127.83	0.41	0.018

表5 排土场边坡土壤团聚体分形维数与土壤理化性质的关系

Tab. 5 Relationships between soil aggregate fractal dimension and physical and chemical properties on dump slopes

分形维数	含水量	容重	毛管孔隙度	有机质含量
机械稳定性团聚体	−0.560*	0.170	−0.499	−0.535
水稳性团聚体	−0.473	0.304	−0.544	−0.636*

注:数据为相关系数,*表示显著相关($P<0.05$)。

间的凝聚力时,团聚体发生破裂[25]。两种方法测量结果不同,反映问题也不同。综合考虑机械稳定性团聚体和水稳性团聚体以及相互间转化过程,对深入了解团聚体稳定性有重要意义。由表5可知,机械稳定性团聚体D与土壤含水量呈显著负相关($P<0.05$),可能与植被恢复有关,排土场边坡土壤含水量高的地方,植被种类和数量较多[17],植物根系分泌物及其死亡分解后形成的新鲜多糖和腐殖质能团聚土粒,有利于团粒结构形成。水稳性团聚体D与有机质含量呈显著负相关($P<0.05$),可能由于在有机质参与下形成的团粒具有水稳性和多孔性,团粒质量较好。机械稳定性和水稳性团聚体D均与土壤容重和毛管孔隙度不相关($P>0.05$),可能由于排土场土壤组成复杂,含有大量石砾,对土壤密度和渗透性影响较大。

3 讨 论

排土场不同坡位间土壤团聚体稳定性存在差异,恢复5 a阴坡及恢复5 a和10 a阳坡团聚体稳定性从坡上到坡下逐渐增强,而恢复10 a阴坡坡中稳定性最强(图1~图3)。一方面,土壤团聚体稳定性坡下>坡中>坡上的变化规律与以往在坡耕地的研究结果相似[12]。这是由于土壤在发育过程中受到水力侵蚀作用,有机质及养分离子随径流和泥沙从坡上向坡下运移;坡上侵蚀严重,土壤肥力较低,坡下土层变厚,有利于形成团粒结构。另一方面,恢复10 a阴坡稳定性坡中>坡上和坡下。这可能由于坡上受风蚀和水蚀较严重,团聚体破坏较大,坡上土壤颗粒在水力和重力侵蚀作用下到达坡中,由于阴坡土壤水分含量较高,植被逐渐增多(表1),坡中截留作用增强;坡上侵蚀掉落的土壤颗粒大部分堆积在坡中,促使土层厚度增加,团聚体稳定性增强。

排土场边坡土壤团聚体稳定性阴坡高于阳坡。与鲁少波等[16]的研究结果相似,而与黄安等[21]的研究结果相反。这是由于不同地区的气候差异导致结果不同。黄安等[21]在湿润地区研究发现,阳坡接受太阳辐射总量较多,土壤温度较高,水分蒸发较快,促进了土壤微生物活动,增强了土壤肥力,改善了结构,提高了团聚体稳定性。而本研究为半干旱区,影响土壤结构和植物生长的限制因子是水分,阴坡太阳辐射较少,土壤温度较低,水分蒸发较少,更利于植物生长,其植被生物量高于阳坡[17],促进团聚体形成,所以阴坡土壤团聚体稳定性高于阳坡。

随着排土场边坡恢复年限增加,土壤团聚体稳定性略有提高,但差异不显著。刘爱霞等[12]在高速公路边坡研究发现,随着恢复年限延长,植被通过根系和枯落物影响土壤团聚体分布和稳定性。主要由于植物根系能够增加土壤微生物含量,提高土壤酶活性,还能产生根际分泌物(如糖类、有机酸等)作为团聚体的胶结剂,从而促进团聚体的形成和转化[26];同时枯落物腐烂分解能提高土壤养分,促进团聚体形成。本研究区排土场边坡土壤干旱,导致植物根系土壤改良能力较差,枯落物分解困难;加之边坡不断遭受风蚀和水蚀,即使改良的土壤可能又被侵蚀破坏。同时边坡风力较强,特别是冬季和春季,导致大部分枯落物被吹走,保留数量较少。所以,排土场边坡土壤团聚体稳定性受恢复年限影响较小,需要人工措施促进其生态恢复。

总的来说,排土场恢复10 a后,坡上土壤团聚体稳定性下降,而坡中和坡下稳定性提高。这可能由于坡中和坡下土壤在重力和水蚀作用下发生位移,使坡中和坡下积存黏粒数量增加,有利于形成团聚结构;而坡上水土流失及风蚀严重,破坏了团聚体的结构及稳定性。因此,坡上应采取适当的工程措施,如修截水沟、水平阶、鱼鳞坑等,减少水蚀及风蚀影响,促进植被恢复。坡中和坡下可采取植物措施,截流坡上的径流,以保持水土为主。阳坡以恢复草灌为主,阴坡在土壤较厚的地方可种植小乔木,更好的发挥固土作用。

4 结 论

排土场边坡土壤结构较差,易被侵蚀。土壤团聚体稳定性阴坡高于阳坡,恢复5 a阴坡及恢复5 a

和10 a阳坡从坡上到坡下逐渐增强,而恢复10 a阴坡坡中最强;不同恢复年限间团聚体稳定性差异不显著。机械稳定性团聚体分形维数主要受土壤含水量影响,而水稳性团聚体分形维数主要受有机质影响。露天煤矿排土场边坡自然恢复进程缓慢,应根据不同坡位和坡向土壤结构特点采取不同的人工恢复措施。

参考文献(References):

[1] Jackson S T, Hobbs R J. Ecological restoration in the light of ecological history[J]. Science, 2009, 325(5940): 567-579.

[2] Suding K N, Hobbs R J. Threshold models in restoration and conservation: A developing framework[J]. Trends in Ecology and Evolution, 2009, 24(5): 271-279.

[3] 岳建英, 郭春燕, 李晋川, 等. 安太堡露天煤矿复垦区野生植物定居分析[J]. 干旱区研究, 2016, 33(2): 399-409. [Yue Jianying, Guo Chunyan, Li Jinchuan, et al. Colonized wild plants in the reclamation area of the Antaibao opencast coal mine[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(2): 399-409.]

[4] 陕永杰, 张美萍, 白中科, 等. 平朔安太堡大型露天矿区土壤质量演变过程分析[J]. 干旱区研究, 2005, 22(4): 565-568. [Shan Yongjie, Zhang Meiping, Bai Zhongke, et al. Investigation on the evolution of soil quality in the Antaibao large-scaled opencast area [J]. Arid Zone Research, 2005, 22(4): 565-568.]

[5] 王凯, 王道涵, 刘锋, 等. 露天矿排土场边坡自然恢复规律及其环境解释[J]. 生态环境学报, 2014, 23(4): 581-585. [Wang Kai, Wang Daohan, Liu Feng, et al. Effects of soil properties on vegetation restoration on dump slopes of opencast coalmine[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(4): 581-585.]

[6] 唐骏, 党廷辉, 薛江, 等. 植被恢复对黄土区煤矿排土场土壤团聚体特征的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(16): 5067-5077. [Tang Jun, Dang Tinghui, Xue Jiang, et al. Effects of vegetation restoration on soil aggregate characteristics of an opencast coal mine dump in the loess area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(16): 5067-5077.]

[7] 赵文智, 刘志民, 程国栋. 土地沙质荒漠化过程的土壤分形特征[J]. 土壤学报, 2002, 39(6): 877-881. [Zhao Wenzhi, Liu Zhimin, Cheng Guodong. Fractal dimension of soil particle for sand desertification[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(6): 877-881.]

[8] 李阳兵, 魏朝富, 谢德体, 等. 岩溶山区植被破坏前后土壤团聚体分形特征研究[J]. 土壤通报, 2006, 37(1): 51-57. [Li Yangbing, Wei Chaofu, Xie Deti, et al. The fractal features of soil aggregate structure before and after vegetation destruction on karst mountain areas[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(1): 51-57.]

[9] 吕文星, 张洪江, 王伟, 等. 重庆四面山不同林地土壤团聚体特征[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 192-197, 202. [Lyu Wenxing, Zhang Hongjiang, Wang Wei, et al. Characteristics of soil aggregates in different forestlands in Simian Mountains, Chongqing[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(4): 192-197, 202.]

[10] 蒲玉琳, 林超文, 谢德体, 等. 植物篱-农作坡地土壤团聚体组成和稳定性特征[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 122-128. [Pu Yulin, Lin Chaowen, Xie Deti, et al. Composition and stability of soil aggregates in hedgerow-crop slope land[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(1): 122-128.]

[11] 郑子成, 王永东, 李廷轩, 等. 退耕对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J]. 自然资源学报, 2011, 26(1): 119-127. [Zheng Zicheng, Wang Yongdong, Li Tingxuan, et al. Effect of abandoned cropland on stability and distributions of organic carbon in soil aggregates[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(1): 119-127.]

[12] 刘爱霞, 高照良, 李永红, 等. 关中平原高速公路边坡不同植被恢复年限土壤团聚体分形特征研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(1): 219-223, 237. [Liu Aixia, Gao Zhaoliang, Li Yonghong, et al. Fractal characteristics research on soil aggregates during highway slope vegetation restoration of different ages in Guanzhong plain[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(1): 219-223, 237.]

[13] 李传人, 艾应伟, 郭培俊, 等. 铁路边坡不同坡位土壤物理化学性质差异性[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 91-95, 101. [Li Chuanren, Ai Yingwei, Guo Peijun, et al. Differences of soil physicochemical properties in different railway cut-slope positions[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(6): 91-95, 101.]

[14] Rattan L. Physical management of soils of the tropics: Priorities for the 21st century[J]. Soil Science, 2000, 165(3): 191-207.

[15] 王杨扬, 赵中秋, 原野, 等. 黄土区露天煤矿不同复垦模式对土壤水稳性团聚体稳定性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5): 966-973. [Wang Yangyang, Zhao Zhongqiu, Yuan Ye, et al. Effects of different reclamation patterns on the stability of soil water-stable aggregates of an opencast mine in loess area[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(5): 966-973.]

[16] 鲁少波, 杨新兵, 郑建旭, 等. 花岗片麻岩山区土壤水分特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2008, 28(1): 90-93. [Lu Shaobo, Yang Xinbing, Zheng Jianxu, et al. Physics and water characteristic of soil in gneiss granite mountain area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 28(1): 90-93.]

[17] 王凯, 刘锋, 祝畅, 等. 阜新露天矿排土场边坡植物多样性与生产力特征及关系[J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 338-343. [Wang Kai, Liu Feng, Zhu Chang, et al. Plant diversity and productivity on dump slopes of Fuxin opencast coalmines[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(1): 338-343.]

[18] 王凯, 张亮, 刘锋, 等. 阜新露天煤矿排土场边坡土壤质量分异特征[J]. 中国环境科学, 2015, 35(7): 2119-2128. [Wang Kai, Zhang Liang, Liu Feng, et al. Soil quality variability on dump slopes of opencast coalmine in Fuxin[J]. China Environmental Science, 2015, 35(7): 2119-2128.]

[19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000. [Bao Shidan. Soil Agrochemical Analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.]

[20] 史奕, 陈欣, 沈善敏. 有机胶结形成土壤团聚体的机理及理论模

型[J]. 应用生态学报, 2002, 13(11): 1495−1498. [Shi Yi, Chen Xin, Shen Shanmin. Mechanisms of organic cementing soil aggregate formation and its theoretical models[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(11): 1495−1498.]

[21] 黄安, 谢贤健, 周贵尧, 等. 内江市微地形条件影响下土壤团聚体稳定性及分形特征[J]. 水土保持研究, 2012, 19(6): 77−81. [Huang An, Xie Xianjian, Zhou Guiyao, et al. The soil aggregates stability and the fractal features as influenced by tiny terrain conditions in Neijiang City[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(6): 77−81.]

[22] 周玮, 周运超, 鲁秦安. 不同土地利用方式下石灰土土壤团聚体与土壤酶活性的关系[J]. 水土保持通报, 2011, 31(5): 59−64, 162. [Zhou Wei, Zhou Yunchao, Lu Qin'an. Relationship between soil enzyme and aggregates in calcareous soil under different land uses[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31(5): 59−64, 162.]

[23] Salako F K, Hauser S. Influence of different fallow management systems on stability of soil aggregates in southern Nigeria[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2001, 32: 1483−1498.

[24] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review[J]. Geoderma, 2005, 124(1): 3−22.

[25] 王恩姮, 赵雨森, 陈祥伟. 前期含水量对机械压实后黑土团聚体特征的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(2): 241−247. [Wang Enheng, Zhao Yusen, Chen Xiangwei. Effect of antecedent moisture content on aggregate size distribution and characteristics of black soil compacted mechanically[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(2): 241−247.]

[26] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(14): 2099−2103.

Soil aggregates stability and fractal features on dump slopes of opencast coal mine in Funxin, China

WANG Kai[1], NA Enhang[1], ZHANG Liang[2], LIU Feng[3]

(1. College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China; 2. River Embankment Management Station of Longjing, Longjing 133400, Jilin, China; 3. CCTEG Shenyang Research Institute, Shenyang 110016, Liaoning, China)

Abstract: There are serious soil and water loses on dump slopes of opencast coal mines. To provide a theoretical basis for ecological restoration on dump slope, the effects of slope aspect, slope position, and recovery time on soil aggregate stability and fractal features of opencast coal mine dumps in Funxin were explored. In this study, the differences of the mean mass diameter (MMD), geometric mean diameter (GMD), fractal dimension (D) and percentage of aggregate destruction (PAD) among the upper, middle, and lower parts, and between the sunny and shady slopes and their influence factors were analyzed on a five year and ten year recovery slope. Results showed that the MMD and GMD of soil aggregates gradually increased. In contrast, the D and PAD of soil aggregates gradually declined from the upper to the lower parts on a five year recovery shady slope and a five year and ten year recovery sunny slope. The MMD and GMD of soil aggregates on the shady slope were greater than on the sunny slope, and the D and PAD were lower on the shady slope than on the sunny slope. However, no significant differences were found in MMD, GMD, D, and PAD of soil aggregates between the five year and ten year recovery slope. Compared to the bare land, the soil aggregate stability decreased in the upper part but increased in the middle and lower parts. The D of soil aggregates was significantly negatively correlated with >0.25 mm soil aggregates, MMD and GMD were significantly positively correlated with D and PAD of soil aggregates. Moreover, there were significant negative correlations between the D of mechanically stable aggregates and the soil water content, and between the D of water-stable aggregates and organic matter content. These results demonstrated that the soil structure and stability were better on shady than sunny slopes and on lower than upper parts. Therefore, different artificial restoration measures should be conducted based on different slope aspects and positions.

Keywords: mine dump; soil aggregate; slope aspect; slope position; mine ecological restoration